ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 45, № 6, с. 412–421

ВТОРАЯ ВСПЫШКА ЖЕЛТОЙ СИМБИОТИЧЕСКОЙ ЗВЕЗДЫ LT ДЕЛЬФИНА

© 2019 г. Н. П. Иконникова[1*], Г. В. Комиссарова[1], В. П. Архипова[1]

[1] Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 28.01.2019 г.; после доработки 28.01.2019 г.; принята к публикации 29.01.2019 г.

Приводятся результаты фотоэлектрических UBV-наблюдений желтой симбиотической звезды LT Del за 2010–2018 гг. Двойная система LT Del, состоящая из яркого K гиганта и компактной горячей звезды с температурой около 100 000 K, имеет орбитальный период 476 дней. В 2017 г. переменная испытала вторую в истории исследований малоамплитудную ($\Delta V \sim 0\overset{m}{.}7$) вспышку, максимум которой пришелся на фазу 0.15±0.05 орбитального периода. Продолжительность вспышки составила около 60 дней. Показатели цвета $B-V$ и $U-B$ во вспышке заметно поголубели. Обнаружено различие фотометрического поведения звезды во вспышках 1994 и 2017 гг. В орбитальном цикле, предшествующем вспышке 2017 г., на кривых блеска в полосах B и V появился вторичный минимум с глубиной $0\overset{m}{.}15$ и $0\overset{m}{.}20$ соответственно, причина которого обсуждается. Приводятся и объясняются фазовые кривые блеска и показателей цвета, интерпретируется положение звезды на двухцветной диаграмме. Получены оценки параметров холодного и горячего компонентов системы, основанные на определении расстояния по результатам миссии GAIA.

Ключевые слова: симбиотические звезды, двойные системы, фотометрические наблюдения.

DOI: 10.1134/S0320010819050024

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссионный объект He 2-467 из каталога Хенайза (1967), некоторое время после открытия считавшийся планетарной туманностью, в работе Калера и Лютц (1980) был причислен к немногочисленной группе желтых симбиотических систем, холодные компоненты которых имеют спектральный класс не позднее K5. Двойная система He 2-467 состоит из яркого G- или K-гиганта и компактной горячей звезды с температурой около 100 000 K. Эмиссионный спектр возбуждается излучением горячей звезды и в оптическом диапазоне состоит из линий водорода, нейтрального и ионизованного гелия. По данным инфракрасной (ИК) фотометрии Аллен (1984) классифицировал He 2-467 как симбиотическую типа S — двойную систему без околозвездной пылевой оболочки.

Переменность блеска He 2-467 была открыта Архиповой и Носковой (1985). Авторами была обнаружена периодичность изменений блеска в полосах UBV с периодом около 480 дней. Форма кривых блеска и рост амплитуды от полосы V к полосе U позволили предположить, что переменность связана с так называемым эффектом отражения, т.е. нагревом и ионизацией ультрафиолетовым излучением белого карлика верхних слоев атмосферы холодного компонента, обращенной к горячему. По результатам этой работы звезда была включена в каталог переменных звезд (Самусь и др., 2017) и получила обозначение LT Del. В последующих работах период уточнялся, и по результатам наблюдений 1982–2009 гг. была принята эфемерида $\mathrm{JD(Min)} = 2445930 + 476\overset{d}{.}0E$ (Архипова и др., 2011).

В 1994 г. звезда испытала первую вспышку, которая была обнаружена Пасуэлло и др. (1994) и детально исследована Архиповой и др. (1995a,b). Это событие позволило отнести LT Del к классическим симбиотическим звездам. В работе Архиповой и др. (2011) было показано, что холодный компонент системы не заполняет свою полость Роша, потеря вещества происходит в виде звездного ветра с темпом $\dot{M} \sim 2.5 \times 10^{-8}\ M_{\odot}$ в год, и вспышечная активность связана с небольшими вариациями темпа потери вещества холодным компонентом.

В 2017 г. Мунари и др. (2017) сообщили об обнаружении новой вспышки. В настоящей работе представлены результаты наших фотоэлектрических UBV наблюдений за период с 2010 по 2018 г., дается описание вспышки 2017 г. и проводится

*Электронный адрес: ikonnikova@gmail.com

Таблица 1. UBV-фотометрия LT Del в 2010–2018 гг.

JD	V	B	U	$B-V$	$U-B$	JD	V	B	U	$B-V$	$U-B$
2455305	13.050	14.360	14.210	1.310	−0.150	2456247	12.944	14.374	14.228	1.430	−0.147
2455329	13.040	14.310	14.350	1.270	0.040	2456249	13.018	14.374	14.009	1.356	−0.365
2455337	12.980	14.380	14.420	1.400	0.040	2456431	13.145	14.575	14.672	1.430	0.096
2455385	13.270	14.700	14.790	1.430	0.090	2456451	13.135	14.495	14.593	1.360	0.099
2455416	13.270	15.000	14.880	1.730	−0.120	2456454	13.099	14.472	14.538	1.373	0.066
2455444	13.160	14.800	15.160	1.640	0.360	2456480	13.096	14.428	14.361	1.331	−0.067
2455448	13.150	14.670	15.120	1.520	0.450	2456510	13.089	14.389	13.991	1.300	−0.398
2455454	13.070	14.510	14.920	1.440	0.410	2456514	13.066	14.383	14.094	1.318	−0.290
2455455	13.090	14.540	14.890	1.450	0.350	2456534	13.096	14.397	13.975	1.301	−0.421
2455502	13.080	14.470	14.560	1.300	0.090	2456537	13.091	14.379	13.859	1.288	−0.520
2455505	13.100	14.450	14.560	1.350	0.110	2456574	13.085	14.362	13.766	1.277	−0.597
2455507	13.100	14.460	14.570	1.360	0.110	2456591	13.079	14.312	13.720	1.233	−0.592
2455508	13.090	14.490	14.540	1.400	0.050	2456784	13.165	14.562	14.639	1.397	0.077
2455717	13.020	14.280	13.680	1.260	−0.600	2456832	13.184	14.710	15.207	1.526	0.496
2455719	13.070	14.270	13.700	1.200	−0.570	2456837	13.161	14.703	15.366	1.542	0.663
2455743	12.970	14.310	13.790	1.340	−0.520	2456860	13.202	14.777	15.435	1.575	0.657
2455745	13.050	14.280	13.870	1.230	−0.410	2456870	13.211	14.754	15.485	1.543	0.731
2455750	13.050	14.310	13.870	1.260	−0.440	2456893	13.202	14.610	14.892	1.408	0.282
2455751	13.040	14.310	13.880	1.270	−0.430	2456930	13.058	14.494	14.580	1.436	0.087
2455774	13.030	14.340	14.010	1.310	−0.330	2456960	13.085	14.353	14.351	1.269	−0.002
2455778	13.060	14.360	14.080	1.300	−0.280	2457006	13.018	14.489	14.011	1.471	−0.478
2455781	13.050	14.370	14.030	1.320	−0.340	2457167	13.017	14.330	13.898	1.313	−0.431
2455809	13.110	14.480	14.340	1.370	−0.140	2457189	13.030	14.371	14.183	1.341	−0.188
2455810	13.100	14.440	14.450	1.340	0.010	2457217	13.103	14.479	14.349	1.376	−0.130
2455831	13.120	14.500	14.530	1.380	0.030	2457248	13.127	14.493	14.571	1.367	0.078
2455832	13.130	14.540	14.490	1.410	−0.050	2457249	13.107	14.536	14.670	1.428	0.134
2455862	13.230	14.620	14.470	1.390	−0.150	2457250	13.073	14.516	14.617	1.443	0.101
2456040	13.029	14.335	13.959	1.307	−0.376	2457270	13.058	14.495	14.605	1.437	0.110
2456043	13.038	14.325	14.243	1.287	−0.082	2457281	13.139	14.535	14.771	1.396	0.236
2456097	13.152	14.337	13.817	1.185	−0.520	2457301	13.170	14.624	15.122	1.454	0.498
2456182	13.029	14.291	13.693	1.262	−0.598	2457516	13.045	14.270	13.645	1.224	−0.625
2456185	13.013	14.390	13.734	1.377	−0.656	2457544	13.011	14.196	13.423	1.185	−0.773
2456186	13.026	14.313	13.712	1.287	−0.601	2457545	13.032	14.237	13.419	1.205	−0.818
2456216	13.094	14.368	13.911	1.273	−0.457	2457548	13.036	14.195	13.384	1.159	−0.811

Таблица 1. Окончание

JD	V	B	U	$B-V$	$U-B$	JD	V	B	U	$B-V$	$U-B$
2457578	13.260	14.338	13.423	1.078	−0.915	2457985	12.858	13.764	12.691	0.906	−1.073
2457600	13.203	14.280	13.132	1.077	−1.148	2457990	12.887	13.769	12.683	0.882	−1.086
2457602	13.259	14.270	13.172	1.011	−1.098	2457994	12.917	13.844	12.771	0.927	−1.073
2457608	13.195	14.318	13.253	1.124	−1.066	2458010	13.040	13.984	13.016	0.944	−0.968
2457612	13.222	14.279	13.219	1.057	−1.060	2458011	13.071	14.019	13.063	0.948	−0.955
2457634	13.070	14.239	13.325	1.169	−0.913	2458013	13.065	14.011	13.068	0.946	−0.942
2457635	13.118	14.254	13.393	1.136	−0.861	2458015	13.104	14.073	13.156	0.970	−0.918
2457639	13.089	14.206	13.500	1.117	−0.706	2458044	13.088	14.047	13.127	0.960	−0.921
2457640	13.127	14.217	13.416	1.090	−0.801	2458253	13.163	14.616	15.115	1.453	0.498
2457662	13.057	14.223	13.698	1.166	−0.525	2458281	13.176	14.688	15.283	1.512	0.595
2457714	13.063	14.377	14.222	1.315	−0.156	2458290	13.152	14.657	15.104	1.505	0.448
2457875	12.478	13.315	12.346	0.837	−0.970	2458309	13.104	14.496	14.744	1.391	0.249
2457878	12.400	13.261	12.232	0.861	−1.029	2458311	13.129	14.539	14.677	1.411	0.137
2457905	12.366	13.113	11.971	0.746	−1.140	2458337	13.150	14.548	14.618	1.398	0.070
2457907	12.368	13.129	11.938	0.761	−1.191	2458338	13.075	14.494	14.706	1.418	0.212
2457921	12.360	13.157	11.941	0.797	−1.216	2458339	13.122	14.535	14.714	1.414	0.178
2457930	12.368	13.178	11.962	0.810	−1.216	2458342	13.121	14.521	14.696	1.400	0.175
2457931	12.421	13.189	11.972	0.769	−1.217	2458344	13.099	14.493	14.671	1.394	0.177
2457932	12.401	13.187	11.950	0.785	−1.237	2458351	13.090	14.493	14.693	1.403	0.200
2457934	12.389	13.185	11.989	0.796	−1.197	2458366	13.101	14.435	14.344	1.333	−0.091
2457935	12.436	13.221	11.953	0.784	−1.268	2458374	13.074	14.404	14.196	1.330	−0.207
2457936	12.409	13.210	11.956	0.801	−1.254	2458401	13.045	14.381	13.979	1.336	−0.402
2457950	12.573	13.391	12.145	0.818	−1.246						

сравнение фотометрического поведения звезды в 1994 и 2017 гг.

НАБЛЮДЕНИЯ

Систематические фотоэлектрические наблюдения LT Del на телескопе Цейсс-1 Крымской станции ГАИШ МГУ с помощью фотоэлектрического UBV-фотометра конструкции В.М. Лютого (1971) проводятся с 1982 г. Результаты UBV-наблюдений до 2010 г. были опубликованы в работах Архиповой и Носковой (1985, 1988), Архиповой и др. (1995а, 2011).

Наблюдения в 2010–2018 гг. проводились на том же телескопе с тем же фотометром с диафрагмой 13″. В качестве фотометрического стандарта использовалась звезда BD+19°4458 с величинами: $U = 12^m.32$, $B = 10^m.52$ и $V = 8^m.98$. Точность наблюдений мы оцениваем как $0^m.01 - 0^m.03$ в полосах V и B и не хуже $0^m.02 - 0^m.04$ в полосе U в зависимости от уровня блеска. С 2010 по 2018 г. получено более 100 оценок UBV-оценок блеска. Результаты наблюдений приведены в табл. 1.

АНАЛИЗ UBV-ФОТОМЕТРИИ

Кривые блеска и цвета

На рис. 1 показаны кривые блеска в полосах UBV, а на рис. 2 — кривые показателей цвета LT Del за весь период фотоэлектрических наблюдений в Крыму с 1982 по 2018 г. За это время

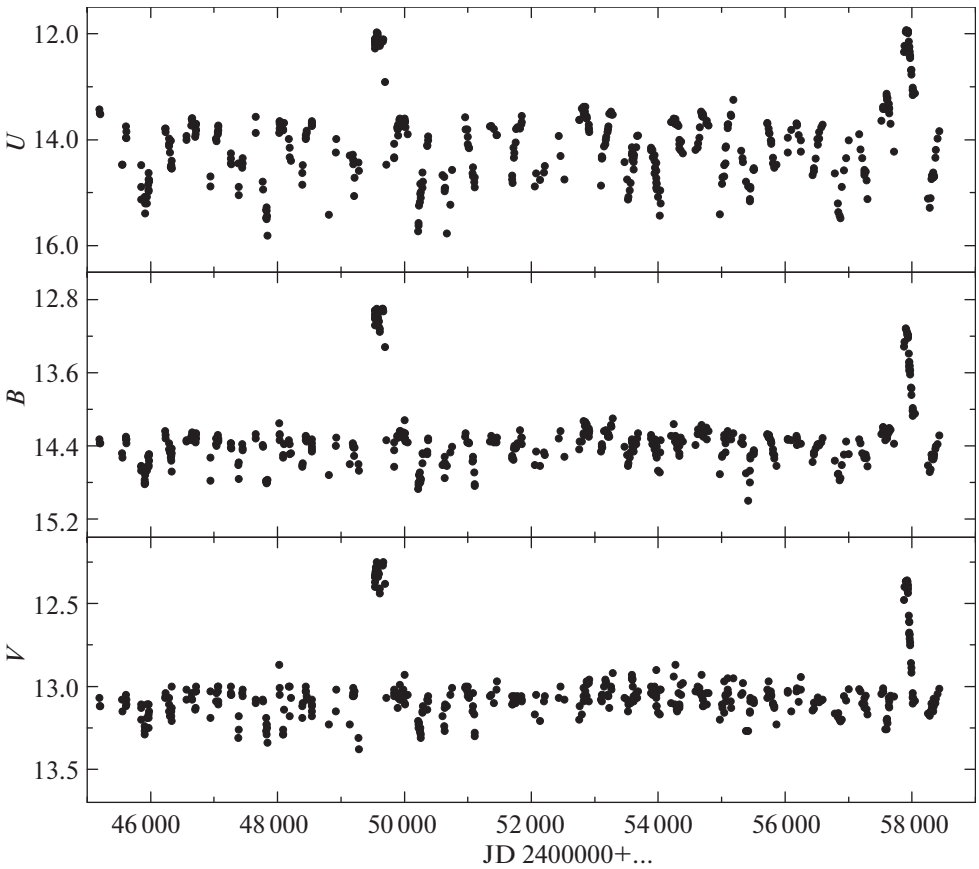

Рис. 1. Кривые блеска LT Del в полосах UBV за период 1982–2018 гг.

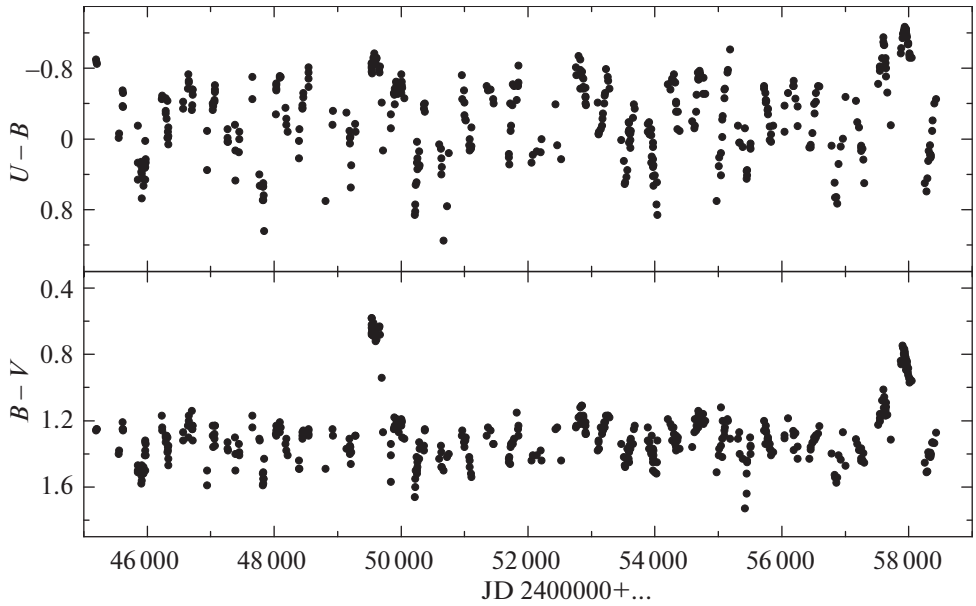

Рис. 2. Кривые показателей цвета LT Del за период 1982–2018 гг.

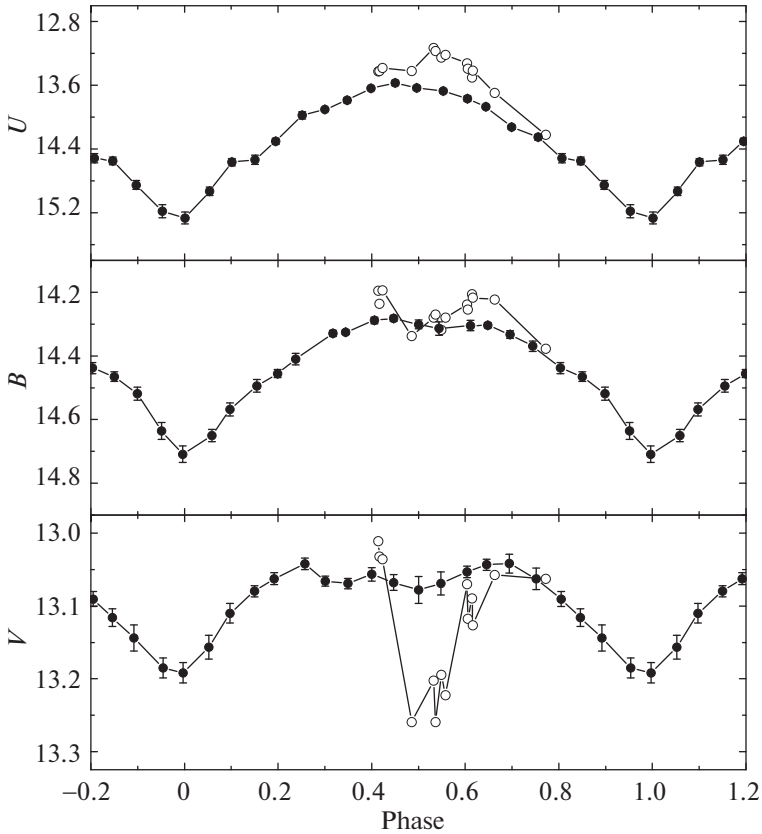

Рис. 3. Усредненные фазовые кривые блеска LT Del в спокойной стадии и наблюдения в предвспышечном состоянии 2016 г. (открытые кружки).

звезда испытала две малоамплитудные вспышки. Вне вспышек переменность блеска связана с изменением условий видимости ионизованной области во время орбитального движения. Амплитуда изменения блеска растет с уменьшением длины волны и составляет: $\Delta V = 0\overset{m}{.}2$, $\Delta B = 0\overset{m}{.}5$, $\Delta U = 1\overset{m}{.}8$. Средние значения блеска переменной в спокойном состоянии равны: $V = 13\overset{m}{.}1$, $B = 14\overset{m}{.}4$, $U = 14\overset{m}{.}2$. На рис. 3 приведены фазовые кривые блеска, усредненные с шагом по фазе 0.05 за период наблюдений с 1982 по 2015 г., за исключением события 1994 г. Они рассчитаны с линейными элементами $\mathrm{JD(Min)} = 2445930 + 476\overset{d}{.}0E$ из работы Архиповой и др. (2011). Фаза минимума 0.0 соответствует положению, когда холодный компонент впереди горячего.

Форма орбитальных кривых блеска LT Del в полосах U и B близка к синусоидальной, тогда как в полосе V наблюдается довольно широкий максимум и незначительное ослабление блеска в фазе 0.5. Для описания формы кривой блеска Скопал (2001) предложил использовать параметр

$$a = [m(0) - m(0.25)]/[m(0) - m(0.5)],$$

где $m(0)$ — звездная величина в минимуме блеска, $m(0.25)$ — в фазе 0.25 и $m(0.5)$ — в максимуме блеска. Для LT Del мы получили $a_V = 1.2$, $a_B = 0.8$, $a_U = 0.7$. Значение параметра $a \sim 1$ указывает на присутствие вторичного минимума на кривой блеска V. В работе Скопала (2001) подробно обсуждается вопрос об эффекте отражения как возможной причине наблюдаемой периодической переменности ряда симбиотических звезд. Показано, что эффект отражения приводит к строго периодической модуляции блеска с орбитальной фазой при $a < 0.5$, амплитуда изменения блеска при этом не должна превышать $0\overset{m}{.}1$. Сделан вывод о том, что наблюдательные характеристики кривых блеска отдельных симбиотических двойных (в том числе LT Del) не могут быть воспроизведены эффектом отражения, а вызваны изменением с фазой орбитального периода меры эмиссии (EM) газовой составляющей.

В 1994 г. звезда испытала первую в истории наблюдений вспышку с амплитудами $\Delta V = 0\overset{m}{.}8$, $\Delta B = 1\overset{m}{.}4$, $\Delta U = 1\overset{m}{.}9$, во время которой наблюдалось заметное поголубение $B - V$ и незначительное — $U - B$. Вспышка наблюдалась на фазах

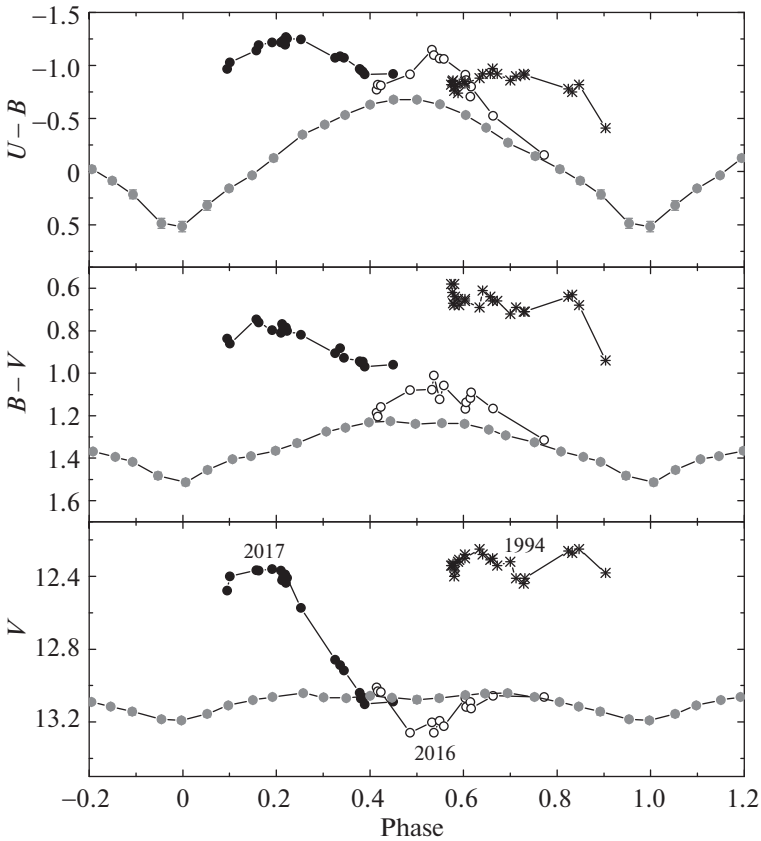

Рис. 4. Наблюдения во вспышках 1994 г. (перечеркнутые кресты) и 2017 г. (заполненные кружки), а также в предвспышечном состоянии в 2016 г. (открытые кружки), свернутые с орбитальным периодом, и усредненные фазовые кривые блеска и цвета LT Del (серые значки, соединенные линией).

0.57–0.90 орбитального периода и продолжалась около 160 дней.

Через 23 года (в 2017 г.) произошло второе подобное событие. В самом начале наблюдательного сезона (2 мая 2017 г.) мы застали звезду в ярком состоянии блеска. Через несколько дней появилось сообщение о вспышке LT Del (Мунари и др., 2017). По данным Мунари и др. (2017) 6 мая 2017 г. звезда имела блеск $U = 12^m.65$, $B = 13^m.278$, $V = 12^m.407$, $R = 11^m.705$ и $I = 11^m.135$ и была почти такой же яркой, как во вспышке 1994 г. Все показатели цвета стали более голубыми.

Весь сезон 2017 г. мы довольно подробно наблюдали звезду и проследили ее фотометрическое поведение со 2 мая до 15 октября. Амплитуды новой вспышки составили: $\Delta V = 0^m.7$, $\Delta B = 1^m.3$, $\Delta U = 2^m.2$. Показатели цвета $B - V$ и $U - B$ заметно поголубели. В самом ярком состоянии звезда пребывала около 60 дней, после чего началось ослабление блеска с темпом $0^m.015$ в сутки в полосе U. К концу наблюдательного сезона 2017 г. блеск LT Del в полосе V опустился до средних величин для соответствующих орбитальных фаз, тогда как в полосах B и U звезда оставалась более яркой.

В табл. 2 приведены некоторые характеристики двух вспышек LT Del: продолжительность (ΔT), фазы орбитального цикла, на которые пришлась вспышка, максимальный блеск, показатели цвета и амплитуды вспышек. Следует отметить некоторое различие фотометрического поведения звезды в двух вспышках. Вспышка 1994 г. была более продолжительной. При примерно равной амплитуде вспышек в полосе V показатели цвета различались. Вспышка 1994 г. была более голубой в $B - V$ и более красной в $U - B$.

На рис. 4 показаны средние фазовые кривые блеска и показателей цвета для спокойного состояния и положение звезды во вспышках 1994 г. и 2017 г., а также в предвспышечном состоянии в 2016 г., о котором следует рассказать подробнее.

В 2016 г. наблюдения проводились нами с 7 мая по 21 ноября на фазах орбитального периода 0.4–0.8. На фазовых кривых (рис. 3 и 4) открытыми кружками показаны наблюдения, полученные в

Таблица 2. Вспышки 1994 и 2017 гг.

Год	ΔT, d	Фазы	V	B	U	$B-V$	$U-B$	ΔV	ΔB	ΔU
1994	~157	0.57–0.90	12.25	12.90	11.98	0.61	−0.92	0.8	1.4	1.9
2017	~60	0.10–0.20	12.35	13.12	11.94	0.76	−1.25	0.7	1.3	2.2

2016 г. Видно, что в 2016 г. звезда заметно отклонилась от среднего состояния. В полосе U звезда стала ярче на $0\overset{m}{.}2$–$0\overset{m}{.}5$ в зависимости от фазы, в полосе B на фоне общего небольшого поярчания на фазах 0.4–0.6 наблюдалось незначительное (около $0\overset{m}{.}15$) ослабление блеска. В полосе V на этих фазах проявился глубокий, по сравнению со средним уровнем, вторичный минимум. В 2016 г. глубина вторичного минимума в полосе V составила $0\overset{m}{.}2$ и превысила глубину первичного минимума. Показатели цвета $U-B$ и $B-V$ в 2016 г. стали более голубыми, чем в спокойном состоянии на тех же фазах орбитального цикла.

Двухцветная диаграмма $U-B$, $B-V$

Рассмотрим характер изменения показателей цвета LT Del на двухцветной диаграмме $U-B$, $B-V$. Мы исправили наблюдаемые показатели цвета за покраснение с величиной $E(B-V)=0\overset{m}{.}2$ (Скопал, 2005) и нанесли на эту диаграмму усредненные по фазе с шагом 0.1 наблюдения в спокойном состоянии и данные, относящиеся к вспышкам 1994 и 2017 гг. и предвспышечному состоянию в 2016 г. (рис. 5). На графике показаны также положения горячей звезды (черное тело с температуроой T_h выше 50 000 K), газового континуума с электронной температурой $T_e=17\,000$ K (Скопал, 2005) и последовательность ярких гигантов (класс светимости II) (Шмидт-Калер, 1982). Для холодного компонента мы приняли спектральный класс K3II в соответствии с результатами работы Архиповой и др. (2011). На рисунок нанесены также показатели цвета суммарного излучения с переменной долей вклада: 1) холодного компонента и газового континуума; 2) холодного компонента и горячей звезды.

Положение LT Del на двухцветной диаграмме $U-B$, $B-V$ существенно меняется в зависимости от фазы орбитального периода. В спокойном состоянии переменная перемещается вверх и влево от фазы 0.0 до 0.5 примерно вдоль линии, представляющей суммарное излучение яркого гиганта K3II и переменного газового континуума. Диапазон $U-B$ составляет около $1\overset{m}{.}5$ при изменении $B-V$ на $0\overset{m}{.}3$. В работах Архиповой и Носковой (1988) и Архиповой и др. (1995a) такое перемещение интерпретировано как результат изменения видимости газовой составляющей во время орбитального движения компонентов системы.

В минимуме блеска, когда вклад горячего компонента (субкарлик+газовый континуум) в суммарное излучение системы составляет не более 10%, средние наблюдаемые значения блеска и показателей цвета равны: $V=13\overset{m}{.}19$, $B=14\overset{m}{.}71$, $U=15\overset{m}{.}27$, $B-V=1\overset{m}{.}52$, $U-B=0\overset{m}{.}53$. Принимая, что холодная звезда вносит около 90% в полосе B в суммарное излучение системы, мы получили для нее следующие величины: $V=13\overset{m}{.}22$, $B=14\overset{m}{.}82$, $U=16\overset{m}{.}53$. В полосе V на красного гиганта приходится около 97% излучения, а в полосе U его вклад равен 30%.

В предвспышечном состоянии в 2016 г. во время глубокого вторичного минимума LT Del на двухцветной диаграмме сместилась относительно среднего положения в фазах 0.5–0.6 вверх и влево, что можно объяснить уменьшением вклада холодного компонента из-за эффекта эллипсоидальности (обсуждается ниже) и усилением эмиссионного спектра ионизованной области.

Во вспышках переменная на двухцветной диаграмме заметно отклонилась от трека спокойного состояния. В 1994 г. она переместилась в направлении горячих звезд, что указывает на заметное увеличение вклада горячей звезды в суммарное излучение системы. В 1994 г. основные вкладчики в излучение — вспыхнувший субкарлик и холодная звезда с соотношением потоков 2:1 в полосе B. По данным Архиповой и др. (1995b), вид эмиссионного спектра LT Del в 1994 г. по сравнению со спокойным состоянием не претерпел существенных изменений, и вклад эмиссионных линий в полосы системы UBV был незначительным.

Во вспышке 2017 г. соотношение составляющих в излучение системы изменилось иначе, чем в 1994 г. Вместе с возможным увеличением вклада горячей звезды возросло влияние газового компонента. По данным Иконниковой и др. (2019) заметно (в 5–10 раз) увеличились потоки эмиссионных линий в оптическом спектре LT Del. В полосе B вклад наиболее сильных линий HeII λ4686 и Hβ в суммарное излучение возрос на ~13%, что привело

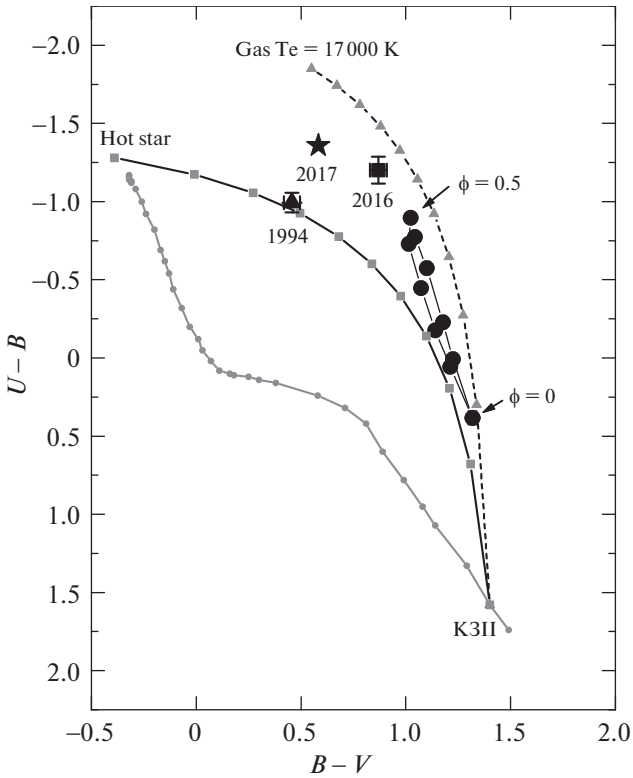

Рис. 5. Положение LT Del на двухцветной диаграмме, исправленное за межзвездное поглощение с $E(B-V) = 0^m.2$. На диаграмму нанесены: усредненные по интервалу фаз 0.1 данные для звезды в ее спокойном состоянии (крупные кружки), средние значения показателей цвета во вспышках 1994 г. (треугольник) и 2017 г. (звездочка), а также перед вспышкой в 2016 г. (прямоугольник). Последовательность ярких гигантов (Шмидт-Калер, 1982) обозначена серыми точками, соединенными линией. Серые треугольники, соединенные линией, — показатели цвета суммарного излучения холодной звезды и газового континуума, рассчитанные с шагом 0.1 в долях вклада отдельных компонентов в суммарное излучение в полосе B. Серые квадраты — то же для суммы излучения горячей звезды и холодного гиганта.

к поголубению показателя цвета $B-V$. Мунари и др. (2017) сообщили о появлении во вспышке линий высокого возбуждения OIII λ3444 и λ3429, OIV λ3411, [Ne V] λ3345 и λ3427, вклад которых в полосу U может быть заметным. Кроме того, увеличился вклад небулярного континуума. В самом ярком состоянии блеска в 2017 г. LT Del имела блеск $V = 12^m35$, $B = 13^m.12$, $U = 11^m.94$. После вычитания холодной звезды с величинами, полученными выше, наблюдаемые звездные величины горячего компонента (звезда + газовый континуум и эмиссионные линии) во вспышке 2017 г. составили $V = 12^m.99$, $B = 13^m.37$, $U = 12^m.10$. Без дополнительных данных об излучении системы в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне оценка вклада горячей звезды вызывает трудности.

Вторичный минимум в 2016 г.

Мы обнаружили, что в орбитальном цикле перед вспышкой 2017 г. на кривых блеска в полосах B и V четко проявился вторичный минимум, который лишь намечался в прежние годы. Причиной этого явления могут быть как эллипсоидальность холодного компонента, так и затмение его горячей звездой.

Рассмотрим возможность затмения холодного компонента горячим субкарликом, увеличившим свой размер. В полосе V основной вкладчик в излучение системы — холодная звезда. Глубина вторичного минимума в 2016 г. $\Delta V = 0^m.2$ соответствует уменьшению потока излучения и соответственно площади диска холодной звезды в $k = 1.2$ раза. В случае центрального затмения, когда требуется минимальное из возможного увеличение размера горячей звезды, из соотношения $k = \pi R(\mathrm{cool})^2/(\pi R(\mathrm{cool})^2 - \pi R(\mathrm{hot})^2)$ для $k = 1.2$ получаем $R(\mathrm{hot})/R(\mathrm{cool}) = \sqrt{(k-1)/k} = 0.41$, т.е. гигант и горячий субкарлик должны иметь сопоставимые размеры. Как будет показано ниже, $R(\mathrm{cool}) \sim 35\ R_\odot$, тогда $R(\mathrm{hot}) = 0.41 \times 35\ R_\odot \sim 14\ R_\odot$. Температура горячей звезды в 2016 г., согласно спектральным наблюдениям, не уменьшилась, следовательно, столь значительное увеличение радиуса по сравнению со спокойным состоянием системы, когда субкарлик имеет радиус $R(\mathrm{hot}) \sim 0.26\ R_\odot$, повлекло бы за собой много-

кратное увеличение светимости системы, что не наблюдалось. Остается признать, что вторичный минимум вызван проявлением эллипсоидальности гиганта перед вспышкой 2017 г., однако и эта интерпретация подвергается сомнению, как показано в разделе “Расстояние и оценка параметров компонентов”.

Более подробное обсуждение обнаруженного нами явления вместе с модельными расчетами кривых блеска будет осуществлено позднее.

РАССТОЯНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ

С использованием двухцветной диаграммы и результатов работы Скопала (2005) мы оценили звездные величины компонентов двойной системы LT Del.

В фазе максимума блеска ($\phi = 0.49$) 14 июня 1990 г. был получен единственный спектр LT Del в УФ-области спектра с помощью IUE спутника. Эти данные вместе с фотометрическими наблюдениями в широком диапазоне длин волн от 0.36 (U) до 5.5 (L) мкм из работы Мунари и Бусона (1992) позволили Скопалу (2005) построить распределение энергии в спектре LT Del в этой фазе орбитального цикла и представить его тремя составляющими: горячей звездой с $T(\mathrm{hot}) = 10^5$ K, газовым континуумом с $T_e = 17\,000$ K и холодным компонентом с $T_{\mathrm{eff}} = 4100$ K. Воспользовавшись рис. 12 из работы Скопола (2005), мы оценили звездные величины горячей звезды, исправленные за покраснение с $E(B-V) = 0\overset{m}{.}2$, как $V = 16\overset{m}{.}36$, $B = 15\overset{m}{.}99$, $U = 14\overset{m}{.}69$. Точность этих оценок составляет $0\overset{m}{.}1$.

В минимуме блеска, когда холодная звезда вносит около 90% в суммарное излучение системы в полосе B, мы получили для нее следующие наблюдаемые величины: $V = 13\overset{m}{.}22$, $B = 14\overset{m}{.}82$, $U = 16\overset{m}{.}53$. Исправленный за покраснение с $E(B-V) = 0\overset{m}{.}2$ блеск холодной звезды в полосе V составляет $V = 12\overset{m}{.}60$.

Нельзя обойти вниманием определение расстояния для LT Del, полученного по новейшим результатам миссии GAIA. Простой переход от параллакса $\pi = 0.0874 \pm 0.0536$ мсек. дуги из GAIA-DR2 (Gaia Collaboration, 2018) к расстоянию привел к нереалистичному значению. Использование более сложной процедуры позволило Бейлеру-Джонсу и др. (2018) получить расстояние $d = 5810.6$ пк с доверительным интервалом 4612–7533 пк. LT Del имеет галактические координаты: $l = 063\overset{\circ}{.}40$, $b = -12\overset{\circ}{.}15$. С новой оценкой расстояния z-координата для звезды составляет $|z| = 1223^{+360}_{-240}$ пк.

Зная расстояние и принимая исправленный за покраснение блеск холодного компонента $V(\mathrm{cool}) = 12\overset{m}{.}60$, мы получили его абсолютную звездную величину с учетом ошибок определения расстояния: $M_V(\mathrm{cool}) = (-1.22^{+0.50}_{-0.56})^m$. С этим значением M_V холодная звезда занимает промежуточное положение между гигантом спектрального класса K3 с $M_V = 0\overset{m}{.}6$ и ярким гигантом K3 с $M_V = -2\overset{m}{.}5$ (Страйжис, 1982). Принимая болометрическую поправку как среднее значение между $BC(\mathrm{K3III}) = -0\overset{m}{.}66$ и $BC(\mathrm{K3II}) = -0\overset{m}{.}57$ (Страйжис, 1982), мы получили болометрическую звездную величину холодной звезды $M_{\mathrm{bol}}(\mathrm{cool}) \sim -1\overset{m}{.}84$ и светимость $L(\mathrm{cool}) \sim 420\ L_\odot$ или $\log L/L_\odot \sim 2.62$. Для звезды с $T_{\mathrm{eff}} = 4400$ K (Перейра и др., 1998) радиус составляет $R(\mathrm{cool}) \sim 35\ R_\odot$. С полученными параметрами и с учетом химсостава $[\mathrm{Fe/H}] = -1.1$ (Перейра и др., 1998) положение холодного гиганта на диаграмме Гершпрунга–Рессела согласуется с эволюционным треком звезды с металличностью $Z = 0.001$ и массой $0.93\ M_\odot$ на стадии красных гигантов (Шарбонель и др., 1996).

Мы оценили также светимость горячей звезды системы LT Del. Как было показано выше, в спокойном состоянии субкарлик имеет исправленную за покраснение с $E(B-V) = 0\overset{m}{.}2$ величину $V(\mathrm{hot}) = 16\overset{m}{.}36$, которой соответствует $M_V(\mathrm{hot}) = (1.93^{-0.57}_{+0.49})^m$ для расстояния $d = 5811^{+1722}_{-1199}$ пк. Болометрическую поправку мы рассчитали с помощью уравнения $BC = 27.66 - 6.84 \log T_{\mathrm{eff}}$ из работы Вакка и др. (1996). Для $T(\mathrm{hot}) = 10^5$ K (Скопал, 2005) мы получили $BC = -6\overset{m}{.}64$. С этим значением BC горячая звезда имеет болометрическую величину $M_{\mathrm{bol}}(\mathrm{hot}) \sim -4\overset{m}{.}61$ и светимость $L(\mathrm{hot}) \sim 5400\ L_\odot$ или $\log L/L_\odot \sim 3.73$. Радиус субкарлика оценивается в $R \sim 0.26 R_\odot$. Согласно современной эволюционной модели на поздних стадиях звезд средних масс Миллера–Бертолами (2016), горячий субкарлик в системе LT Del с приведенными выше параметрами $T_{\mathrm{eff}} \sim 10^5$ K, $\log L/L_\odot \sim 3.73$ и $Z = 0.001$ имеет массу около $0.57\ M_\odot$.

С новыми оценками массы компонентов двойной системы с орбитальным периодом $P = 476^{\mathrm{d}}$ в предположении круговой орбиты мы оценили расстояние между компонентами как $294\ R_\odot$, а размер полости Роша холодного гиганта около $85\ R_\odot$. Следовательно, звезда с радиусом $R(\mathrm{cool}) \sim 35\ R_\odot$ в системе LT Del не заполняет свою полость Роша, и ее форма не искажена приливным взаимодействием с горячим компонентом. Это подвергает сомнению вывод о возможной эллипсоидальности холодного компонента как причине вторичного минимума на кривой блеска в полосе V в 2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2010–2018 гг. получены новые фотоэлектрические наблюдения в полосах UBV желтой симбиотической звезды LT Del. На основании данных, полученных в этой работе, а также результатов других авторов, в частности, новейшего определения расстояния, сделаны следующие выводы:

1. Показано, что в 2017 г. в двойной системе произошла вспышка с амплитудами $\Delta V = 0\overset{m}{.}7$, $\Delta B = 1\overset{m}{.}3$ и $\Delta U = 2\overset{m}{.}2$. Продолжительность вспышки составила около 60 дней. Во вспышке звезда имела существенно более голубые показатели цвета, чем в спокойном состоянии.

2. Сравнение вспышек 1994 и 2017 гг. показало их различие. Событие 1994 г. было более продолжительным. При примерно равной амплитуде в полосе V, вспышка 1994 г. была более голубой в $B-V$ и более красной в $U-B$, чем событие 2017 г. Это указывает на больший вклад газовой компоненты в 2017 г. Учитывая спектральные данные за 2017 г., которые показали заметное усиление линий высокого возбуждения, можно предположить, что в 2017 г. увеличилась температура горячей звезды, тогда как во вспышке 1994 г. компактный объект стал более холодным, как это показано в работе Архиповой и др. (1995b).

3. В предвспышечном состоянии в 2016 г. на кривых блеска в полосах B и V на фазах 0.4–0.6 орбитального периода наблюдались вторичные минимумы, для аргументированной интерпретации которых необходимы дополнительные знания о двойной системе.

4. Оценены параметры холодного и горячего компонентов системы с учетом прямого определения расстояния до двойной системы по результатам миссии GAIA. Получено, что холодная звезда представляет собой желтый гигант с $L(\mathrm{cool}) \sim 420\ L_\odot$ и $R(\mathrm{cool}) \sim 35\ R_\odot$, а горячий субкарлик имеет $L(\mathrm{hot}) \sim 5400\ L_\odot$ и $R(\mathrm{hot}) \sim 0.26\ R_\odot$. Сравнение полученных параметров компонентов системы с теоретическими эволюционными треками позволило оценить массы компонентов: $M(\mathrm{cool}) \sim 0.93\ M_\odot$ и $M(\mathrm{hot}) \sim 0.57\ M_\odot$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен (D.A. Allen), Proc. Astron. Soc. Austral. **5**, 369 (1984).
2. Архипова В.П., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **11**, 706 (1985) [V.P. Arkhipova, R.I. Noskova, Astron. Lett. **11**, 297 (1985)].
3. Архипова В.П., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **14**, 445 (1988) [V.P. Arkhipova and R.I. Noskova, Astron. Lett. **14**, 217 (1988)].
4. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **21**, 379 (1995a) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **21**, 339 (1995a)].
5. Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Письма в Астрон. журн. **21**, 439 (1995b) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **21**, 391 (1995a)].
6. Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **37**, 377 (2011) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **37**, 343 (2011)].
7. Бейлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Mantelet, and R. Andrae), Astron. J. 156:58 (2018).
8. Вакка и др. (W.D. Vacca, C.D. Garmany, and J.M. Shull), Astrophys. J. **460**, 914 (1996).
9. Gaia Collaboration; A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., Astron. Astrophys. **616**, 10 (2018).
10. Иконникова Н.П., Бурлак М.А., Архипова В.П., Есипов В.Ф., Письма в Астрон. журн., в печати (2019).
11. Калер, Лютц (J.B. Kaler and J.H. Lutz), Publ. Astron. Soc. Pacific **92**, 81 (1980).
12. Мунари, Бусон (U. Munari and L.M. Buson), Astron. Astrophys. **255**, 158 (1992).
13. Мунари и др. (U. Munari, P. Ochner, S. Dallaporta, and R. Belligoli), Astronomer's Telegram 10361 (2017).
14. Пасуэлло и др. (Passuello et al.), IAU Circ. 6065 (1994).
15. Перейра и др. (C.B. Pereira, V.V. Smith, and K. Cunha), Astron. J. **116**, 1997 (1998).
16. Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Дурлевич О.В., Киреева Н.Н., Пастухова Е.Н., Астрон. журн. **60**, 87 (2017).
17. Скопал (A. Skopal), Astron. Astrophys. **366**, 157 (2001).
18. Скопал (A. Skopal), Astron. Astrophys. **440**, 995 (2005).
19. Страйжис В.Л., *Звезды с дефицитом металлов* (Вильнюс: Мокслас, 1982).
20. Хенайз (K.G. Henize), Astrophys. J. Suppl. Ser. **14**, 125 (1967).
21. Шарбонель и др. (C. Charbonnel, G. Meynet, A. Maeder, and D. Schaerer), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **115**, 339 (1996).
22. Шмидт-Калер (Th. Schmidt-Kaler), *Landolt-Bornstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology* (Ed. K. Schaifers, H.H. Voigt, New Ser. Group VI, Vol. 2b, Springer Verlag, Berlin, 1982).